

# 해남 라디오미터로부터 산출된 가강수량과 구름물량의 분포특성

원혜영 · 김연희\* · 장동연  
국립기상연구소 예보연구과

(2009년 9월 21일 접수; 2009년 12월 21일 승인)

## Characteristics of Precipitable Water Vapor and Liquid Water Path Retrieved from a Ground-based Microwave Radiometric Profiler at Haenam NCIO

Hye Young Won, Yeon-Hee Kim\* and Dong-Eon Chang

Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research  
(Manuscript received 21 September 2009; in final form 21 December 2009)

### Abstract

Temporal distributions and characteristics of PWV (Precipitable Water Vapor) and LWP (Liquid Water Path) are investigated by using the microwave radiometric profiler at Haenam NCIO from 1 August 2007 to 31 July 2008. Temporal variations of PWV are closely connected with the thermal response of water vapor in atmosphere. The variations of LWP are characterized by the rainfall variation being basically attributable to the heavy rain-bearing clouds. The frequency distributions of PWV and LWP according to the four sky conditions ('clear', 'lightly cloudy', 'cloudy', and 'deeply cloudy') by total cloud amount at Wando Observatory corresponds with a change of slope in cumulative distribution function for PWV and LWP. These results implies that the classification of sky condition can be applied by using the distribution of PWV and LWP from microwave radiometric profiler.

**Key words:** Microwave radiometric profiler, PWV, LWP.

### 1. 서론

대기 중의 수증기는 온도와 압력에 따라 여러 가지 형태로 존재하고 시간과 공간에 따른 분포 변동성이 큰 물리량으로 강수, 복사, 지표 증발산 등과 같은 지표와 대기의 상호 작용 뿐 아니라 대기에 의한 태양복사 흡수 방출에 중요한 역할을 한다. 결과적으로 지구복사수지에도 영향을 미치므로 기후예측분야에서도 중요한 인자이다. 특히, 구름 내 액상의 물(liquid water)에 대한 정보는 구름이나 강수를 형성하는 일련의 과정들에 대한 이해를 돕고 이를 통해 수치모델 내의 구

름-강수 물리 모수화 과정을 향상시키는데 필요하다. 라디오존데를 이용한 기상청의 일 2회 현업 고층관측은 시간적으로 변동성이 큰 수증기와 구름물을 모니터링하고 대기의 열역학적 연직구조 특성을 파악하기에는 충분하지 않다(Güldner and Spänkuch, 1999). 그래서 2~3분 간격으로 온 습도 프로파일뿐 아니라 수증기량과 구름물량을 제공할 수 있는 라디오미터(Microwave radiometric profiler)가 라디오존데의 관측공백을 메우기 위한 첨단 관측 장비로 사용되고 있다. Ware *et al.*(2003)은 라디오미터에서 제공하는 기온과 상대습도의 프로파일을 라디오존데에서 관측한 자료와 비교하여 라디오미터 자료의 정확성과 신뢰성을 확인한 바 있다. 국내에서도 해남 위험기상 집중관측 센터(Radiometrics Corporation, TP/WVP-3029A)와 대관령 슈퍼사이트(Radiometrics Corporation, WVR-1100)에 설치된 라디오미터 장비의 자료 검증 연구들이 수행되었다(전은희 등, 2008; 장기호 등, 2007).

\*Corresponding Author: Yeon-Hee Kim, Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA, 45 Gisangcheong-gil, Dongjak-gu, Seoul, 156-720, Korea.  
Phone: +82-2-6712-0253, fax: +82-2-834-5922  
E-mail: yeonheekim@korea.kr

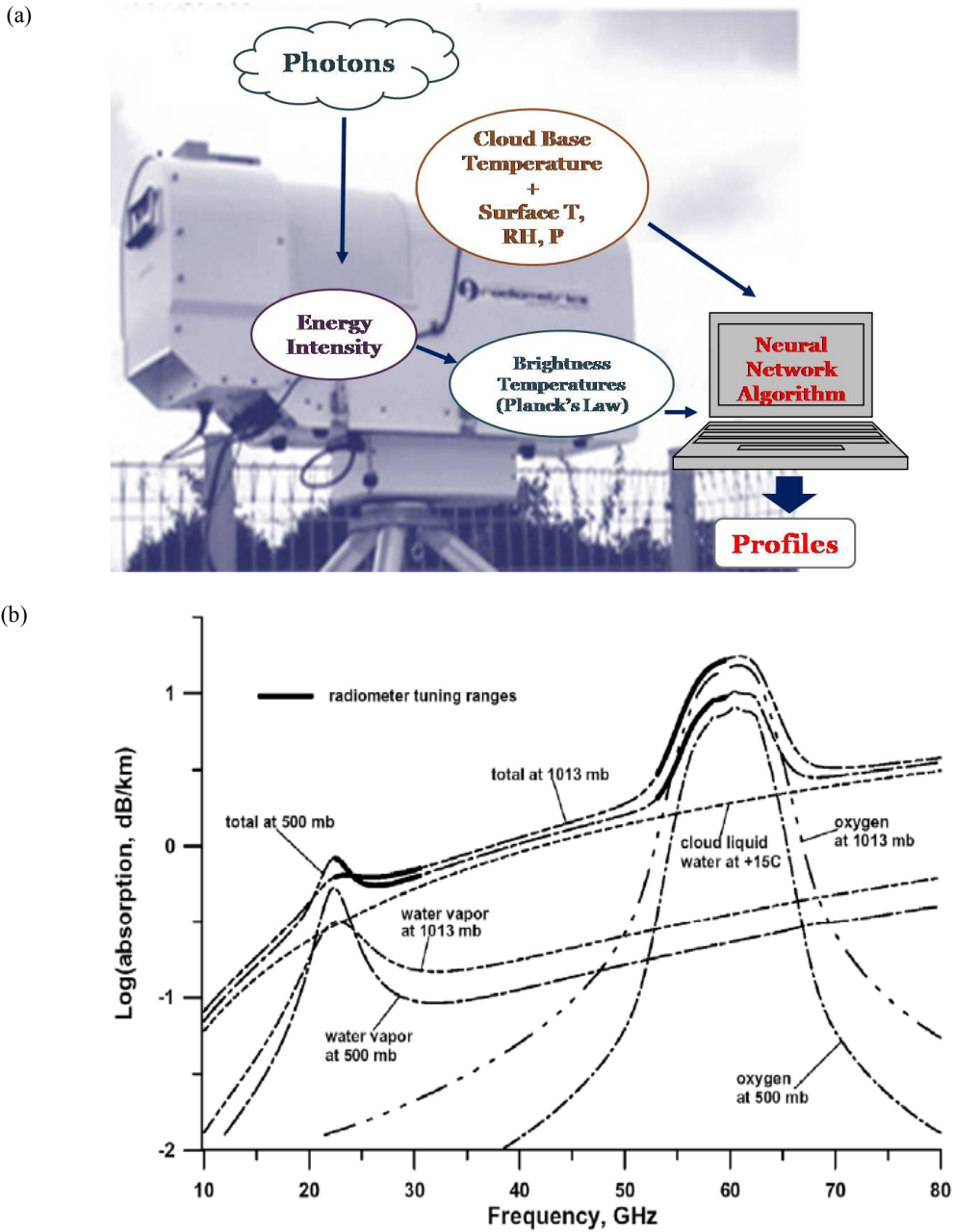
**Table 1.** Instrument specification and output files.

| Function or Parameter                            | Specification   |
|--|---|
| Frequencies                                      | 22 - 30 GHz   |
| water vapor band                                 | 22.2, 22.5, 23.0, 23.8,<br>25.0, 26.2, 28.0, 30.0,<br>51 - 59 GHz   |
| oxygen band                                      | 51.2, 51.7, 52.2, 52.8,<br>53.3, 53.8, 54.4, 54.9,<br>55.5, 56.0, 56.6, 57.2,<br>57.9, 58.8                             |
| minimum frequency step size                      | 4.0 MHz   |
| Pre-detection channel bandwidth                  | 300 MHz   |
| Antenna system optical resolution and side lobes |   |
| 22-30 GHz  | 4.9 - 6.3° -24dB  |
| 51-59 GHz  | 2.4 - 2.5° -27dB  |
| Integration time                                 | 0.01 to 2.5 seconds   |
| Vertical resolution of Data                      | surface ~ 500 m : 50m<br>500 m ~ 2 km : 100 m<br>2 km ~ 10 km : 250 m   |
| Data file format                                 | ASCII (CSV)   |
| Level1 products                                  | Brightness Temperature  |
| ※ algorithm : 4 point nonlinear model            |   |
| Level 2 products                                 | Temperature, Water Vapor , Liquid water and Relative Humidity (RH) profiles and column integrated vapor and liquid data |
| ※ Algorithm : Neural Networks                    |   |

라디오미터에서 산출되는 가강수량(Precipitable Water Vapor)과 구름물량(Liquid Water Path)을 이용하여 다양한 분석 연구들이 수행되었다(e. g. Barbaliscia *et al.*, 1998; Güldner and Spänkuch, 1999; Wang *et al.*, 2002). Barbaliscia *et al.*(1998)은 이탈리아 로마에 설치된 라디오미터(Radiometrics Corporation, WVR-1000)의 밝기온도, 총수증기량(Integrated Water Vapor), 구름물량(Liquid Water Content) 자료를 이용하여 이들의 연변화, 계절변화, 일변화 등을 조사하였고, Doran *et al.*(2002)은 알래스카의 해안과 내륙지역에 각각 설치된 두 개의 라디오미터(Radiometrics Corporation, Dual-channel radiometer)에서 산출된 구름물량을 이용하여 해안지역과 내륙지역의 구름 특성을 분석하기도 하였다. Wang *et al.*(2002)은 라디오미터를 이용하여 가강수량 프로파일의 일변동을 분석하여 이를 라디오존데로부터 계산한 혼합비와 비교하였다. Iassamen *et al.* (2009)은 라디오미터(Radiometrics Corporation, TP/WVP-3000)를 이용하여 두 가지 하늘상태(맑은 날과 흐린 날)에 따른 대류권 내 수증기의 통계적 분포 특성을 분석하였다. 이 외에도 라디오미터와 더불어 구름 레이더와 같은 다른 원격탐사 관측장비를 장기간

운영하고 관측하여 그 지역의 가강수량과 구름물량 특성뿐만 아니라 운저 고도, 구름의 연직 구조 등 구름물리 특성을 조사한 선행연구들이 있다(Dong and Mace, 2003; Snider, 2000).

국내에서 수행된 관련 연구들은 라디오미터 산출변수에 대한 라디오존데 관측이나 GPS 산출 가강수량과의 비교 등 기기 검증과 산출자료 분석에 관한 연구(e.g. 장기호 등, 2007; 조정호 등, 2001; 하지현 등, 2007)들이 대부분이다. Won *et al.* (2009)은 강수 발생 전 라디오미터의 밝기온도 변화를 이용한 강수예측 및 강우강도 추정에 관한 알고리즘을 실제 강수 예측과 강우강도 추정에 적용하여 향상된 결과를 제시하였다. 조희구와 이승만(1982)은 1972년부터 1979년까지의 고층관측 자료로부터 산출된 가강수량의 월변화를 조사하였고, 김기훈 등(2009)은 라디오존데 관측자료의 관측 자료 평가를 위하여 GPS 가강수량 자료를 이용하여 라디오존데 관측 지점별, 센서별 편차 특성을 분석하였다. Kwon *et al.* (2007)은 2년간 국내에서 비양된 라디오존데 관측자료와 GPS 가강수량 자료 간의 평균 관측 편차가 -1.50 mm, 평방근오차 (RMSE, Root Mean Square Error)가 2.45 mm임을 밝혔다.



**Fig. 1.** (a) The receiving/processing data procedure of the microwave radiometric profiler (Radiometrics Corporation, TP/WVP-3029A) at Haenam NCIO and (b) absorption spectrum for two altitudes and water vapor densities (Solheim *et al.*, 1998).

해남 위험기상 집중관측 센터(Haenam NCIO, National Center for Intensive Observation of Severe Weather (34.55°N, 126.56°E))에는 시공간적으로 고해상도의 온습도 프로파일을 제공하여 대기의 연직구조를 상세히 관측할 수 있는 라디오미터가 2007년 7월에 설치되

었고 8월 23일부터 지속적으로 관측자료가 생산되었다(국립기상연구소, 2008). 2009년 3월에 장비장애가 발생하여 관측장비를 미국 제작사에 보내어 수리완료하였고 이후 동해상 고층기상관측의 일환으로 4월 25일부터는 울릉도 기상대에 이전 설치되어 현재까지 관

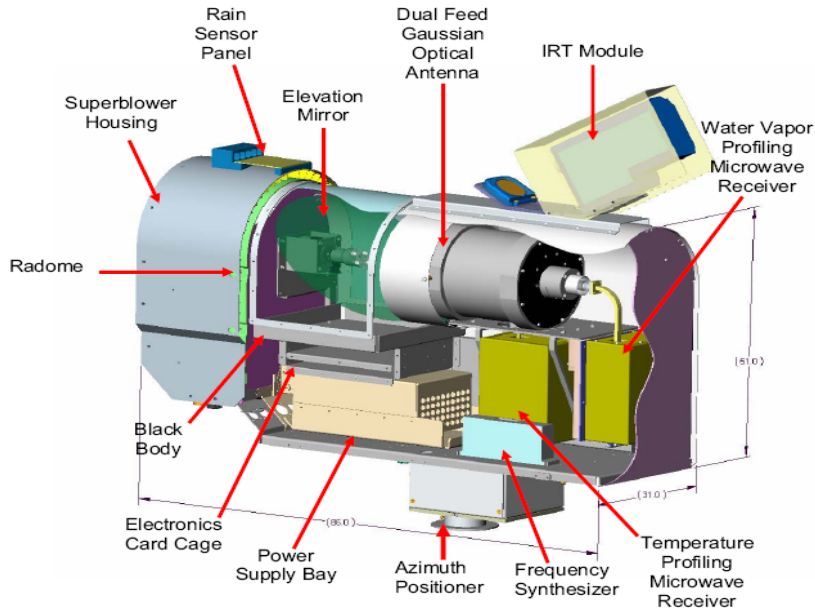


Fig. 2. Microwave radiometric profiler cut-away diagram (from Radiometrics Corporation, 2007).

측이 수행되고 있다. 해남의 라디오미터에서는 수분 단위로 가강수량과 구름물량이 산출되어 월변화, 계절 변화 뿐만 아니라 일변화를 조사하기에 충분하다.

본 연구에서는 라디오미터의 산출자료인 밝기온도, 가강수량과 구름물량 자료를 이용하여 해남지역에서의 이들의 분포 특성을 살펴보고자 한다. 관측장비와 자료에 대한 간략한 소개를 2절에서 기술하였고 3절에서는 누적분포함수와 EMD(Empirical Mode Decomposition) 방법을 이용한 가강수량과 구름물량의 시간별 분포 특성 분석 결과를 제시하고 운량을 이용한 하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 빈도분포 결과도 함께 나타내었다. 마지막으로 4절에는 분석결과의 요약 및 결론으로 구성하였다.

## 2. 관측장비와 자료

해남에 설치된 라디오미터는 22~30 GHz와 51~59 GHz의 두 개의 주파수 밴드를 이용하여 지표에서 10 km까지 기온과 수증기밀도의 연직분포를 생산하는 관측장비이다. Table 1과 Fig. 1에 라디오미터의 기본 규격 및 산출자료와 간략한 관측원리를 나타내었다. 라디오미터는 대기복사량을 수동적으로 측정하는 장비로써 어떠한 복사량도 방출하지 않으며 Table 1에서와 같이 기온 프로파일을 생산하기 위한 51~59 GHz, 수

증기밀도 프로파일을 생산하기 위한 22~30 GHz 주파수 대역을 사용한다. 이는 Fig. 1에서 보듯이 22~60 GHz 범위를 관측하게 되는 일반적인 중위도 해면고도에서 받는 대기 흡수 스펙트럼의 분포가 22.2 GHz에서는 수증기밀도에 60 GHz에서는 대기 산소량에 민감하게 반응하는 특징에 기인한다(전은희 등, 2008). 본 연구에 사용된 라디오미터는 22.2, 22.5, 23.0, 23.8, 25.0, 26.2, 28.0, 30.0 GHz의 8개의 수증기 채널과 51.2, 51.7, 52.2, 52.8, 53.3, 53.8, 54.4, 54.9, 55.5, 56.0, 56.6, 57.2, 57.9, 58.8 GHz의 14개의 산소 채널로 구성되어 있다. 각 주파수 채널에서 관측된 대기로부터 방출된 에너지가 플랑크 법칙(Plank's Law)으로부터 밝기 온도로 변환된 후 인공신경망 방법을 통해 기온, 상대습도, 수증기 밀도, 구름물 밀도의 프로파일 자료를 생산하게 된다(Radiometrics Corporation, 2007).

Fig. 2는 라디오미터의 내부 단면도를 나타낸 그림이다. 기온, 상대습도, 기압 등의 지상 센서들과 운저온도를 측정하기 위한 적외선 온도계(Infrared thermometer, IRT)가 탑재되어 있으며 이들의 자료는 연직프로파일 생산을 위해 사용된다. 안테나 레이돔 위의 수직은 밝기온도를 측정하는데 오차를 유발할 수 있으므로 이를 최소화하기 위해 레이돔은 수직을 흘러버릴 수 있는 소수성 재질로 되어 있으며 강한 바람으로 레이돔의

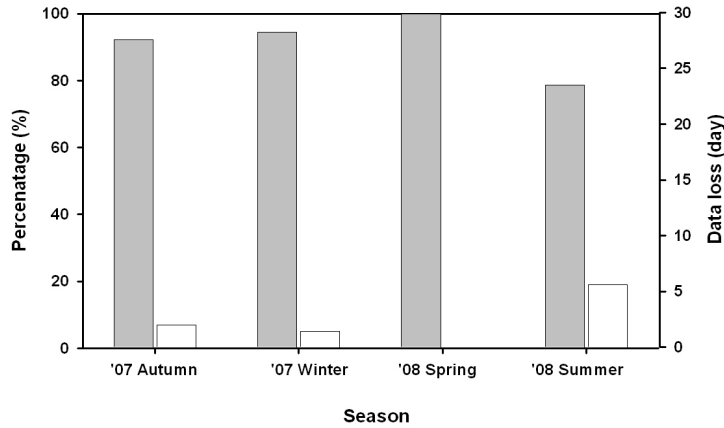


Fig. 3. Collection rate of data (shaded bars) and data loss (blanked bars) during each season.

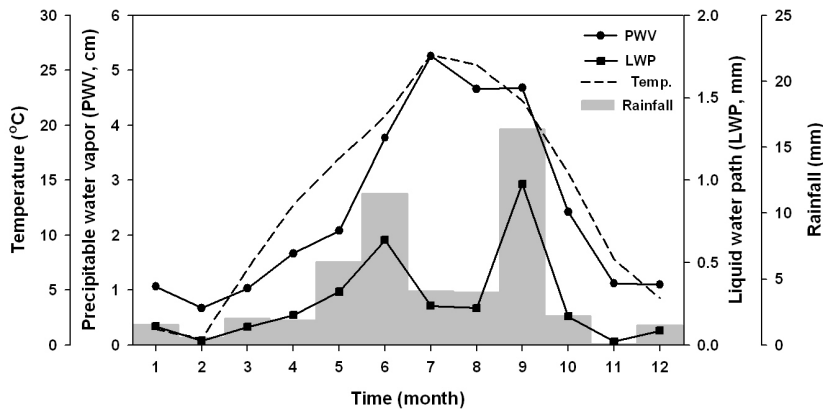


Fig. 4. Monthly mean of precipitable water vapor (circles-solid line), liquid water path (square-solid line), accumulated rainfall (vertical bars), and surface air temperature (dash-line) from 1 September 2007 to 31 July 2008.

수적을 날려버릴 수 있는 슈퍼블로우가 함께 장착되어 있다. 강우감지 센서가 위쪽에 탑재되어 있고 내부에 기온 및 습도 센서가 부착되어 있다.

본 연구를 위해 2007년 9월 1일부터 2008년 8월 30일까지 1년간의 라디오미터 산출자료를 분석일까지 하루 내에 수집된 자료가 75% 이하인 날은 분석에서 제외하였다. 분석에 사용한 자료는 맑기온도(Level 1), 가강수량(Level 2), 구름물량(Level 2) 자료이다. 계절 별로 평균된 자료의 수집률을 살펴보면 2007년 여름을 제외하지 봄(99.7%), 가을(92.1%), 겨울(94.5%)에 거의 90% 이상의 자료 수집률을 보이고 있으나 여름철의 경우 관측장비와 자료수신 부분의 장애로 19일 동안의 자료손실이 발생하여 자료 수집률이 78.7%로 가장 낮았다(Fig. 3). 하지만 본 연구의 분석한 년에 여름철 관측자료의 부족으로 인한 분석일 오류는 없다

고 사료된다.

가강수량과 구름물량의 시간 변화를 조사하기 위한 EMD 방법은 원시 시계열 자료를 각각의 다른 진폭과 주기를 가지는 독립적인 시계열들로 분해하는 비교적 새로운 기법으로 일종의 고속푸리에 변환(Fast Fourier transform)이나 파엽분석(Wavelet)과 유사하지만 비선형(nonlinear)이고 비정상(non-stationary)적 시계열 자료의 규모 분해가 가능한 이점이 있다(Huang *et al.*, 1998; McMahon *et al.*, 2008; Torrence and Compo, 1998).

EMD 분석을 간단하게 나타내면 식(1)과 같다(Huang and Wu, 2008).

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (1)$$

여기서,  $x(t)$ 는 원시 시계열 자료이고  $c_j$ 는 고유모드 시계열(Intrinsic Mode Function)을 나타내는데 이들은

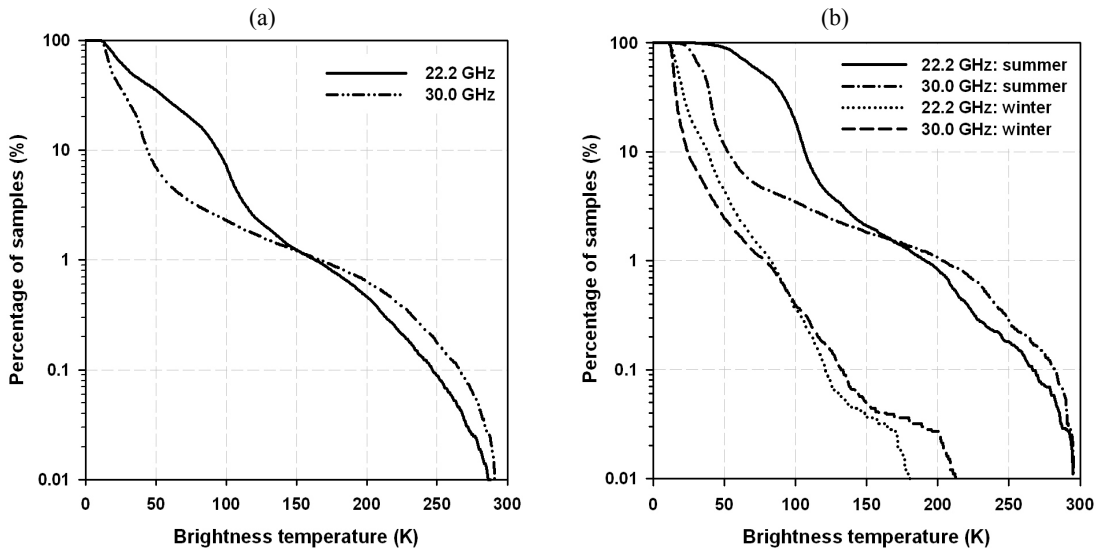


Fig. 5. (a) Annual and (b) seasonal cumulative distribution of brightness temperature at 22.3 and 30.0 GHz (from 1 September 2007 to 31 August 2008).

각자의 주기와 진폭을 가지는 시간규모가 다른 시계열이다.  $r_n$  은 원시 시계열에서  $n$ 개의 고유 시계열들을 뺀 나머지며 원시 시계열이 가지고 있는 가장 저주기 시계열로 ‘경향(trend)’이라고도 한다. 즉, EMD 분석을 통해 원시 시계열은 다양한 시간규모의 독립적인 고유 모드 시계열들(IMFs)과 경향(trend) 분해가 되는 것이다. EMD 분석의 중간과정과 예시 그림은 McMahon *et al.*(2008)을 참조하기 바란다. 실제 라디오미터 자료의 EMD 분석은 다양한 통계패키지와 그래픽을 지원하는 R이라는 프로그램을 이용하여 수행하였고 Kim and Oh (2008)에 의해 코딩된 EMD 패키지를 이용하였다.

### 3. 결 과

다양한 시간기준에 대한 두 물리량의 분포 특성을 살펴보기 위해 월평균, 일평균을 비롯하여 누적분포함수와 빈도분포함수, EMD 방법 등을 이용하여 계절변화, 월변화, 시간변화에 대해 살펴보았다.

#### 3.1 가강수량과 구름물량의 월변화

2007년 9월부터 2008년 8월까지의 가강수량과 구름물량 월평균을 해남 관측소의 지상기온과 일누적강수의 월평균 시계열과 함께 나타내었다(Fig. 4). 가강

수량의 월변화를 살펴보면, 7월 평균 가강수량이 5.26 cm로 가장 크며 2월 평균 가강수량은 0.67 cm로 가장 적은 값을 보였다. 여름철 가강수량 값이 평균 4.56 cm로 다른 계절(봄(1.59 cm), 가을(2.74 cm), 겨울(0.94 cm))에 비하여 월등히 크며 9월까지 높은 값이 지속되는 계절적 특징이 나타났다. 월평균 지상기온의 분포도 가강수량의 월평균 변화와 유사하여 두 변수의 상관관계수가 0.94로 높은 상관을 보여준다. 대기 중에 존재하는 수증기량은 온도의 함수이므로 수증기의 열적 반응(thermal response)으로 이러한 기후학적인 가강수량의 변동이 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 반해 구름물량의 월변화에서는 연중 6월과 9월에 두 번의 극값이 각각 0.63 mm와 0.97 mm로 나타났고 월평균 강수량도 장마에 의해 6월과 태풍의 영향으로 인해 9월에 가장 많아 유사한 변동을 보이며 두 변수의 상관관계수는 0.99로 아주 높은 상관을 보인다. 이러한 구름물량의 월변화는 강수량의 월변화에서도 유추할 수 있듯이 6월과 9월에 강수발생 가능 구름(rain-bearing clouds)이 빈번히 발생하는 것에서 기인한 것으로 사료된다.

가강수량과 구름물량의 월변화 분포 특성을 상세히 살펴보기 위해 일년간의 라디오미터 밝기온도, 가강수량, 구름물량에 대해 계절별과 월별 분포를 누적분포함수(Cumulative Distribution Function)를 이용하여 분석하였다. 이를 위해 수증기와 구름물과 관련이 높은 두 채널인, 22.2 GHz와 30.0 GHz의 밝기온도에 대

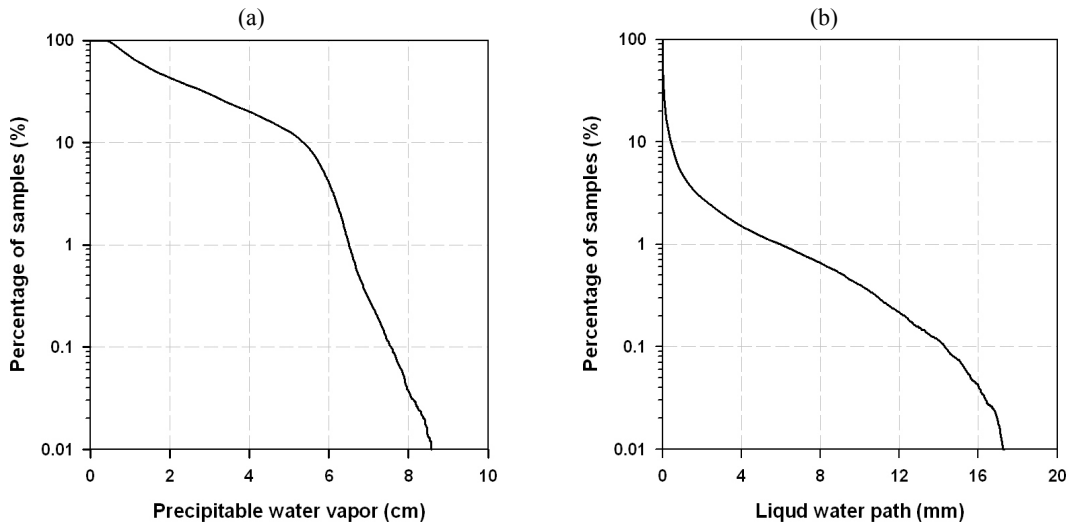


Fig. 6. The same as Fig. 5(a), but for (a) precipitable water vapor and (b) liquid water path.

한 누적분포 함수 분석을 수행하였다. Fig. 5는 두 채널 밝기온도의 일년간 누적분포와 계절별 누적분포를 보여준다. 두 채널의 누적분포 선이 교차하는 지점을 기준으로 전체시간(일년)의 1% 이상과 이하의 두 부분으로 구분이 될 수 있는데, 이는 강수발생 가능 구름이 발생하는 시간과 맑거나 혹은 약한 흐림 정도의 날씨가 나타나는 정도를 구분 짓는 경계라고 할 수 있다 (Barbaliscia *et al.*, 1998). 즉, 하늘 상태가 맑거나(clear sky) 약간 흐림 때(lightly cloudy)에는 구름물보다는 대기 중의 수증기에 의한 흡수과정이 지배적이기 때문에 표본 비율이 1 ~ 100%인 약 99% 이상의 영역에서는 수증기에 민감한 22.2 GHz에서의 밝기온도 변화가 상대적으로 민감하게 나타난다. 반대로, 0 ~ 1% 정도의 영역에서는 강수발생 가능 구름이 발생되어 구름형성에 의한 대기 중 구름물량이 증가하므로 30.0 GHz에서의 밝기온도가 22.2 GHz에 비해 더 높게 나타난다(Fig. 5(a)). 또한 99% 이상의 영역에서 22.2 GHz와 30.0 GHz에서의 뚜렷한 기울기의 변화가 105K(5%)와 50 K(7%)에서 각각 나타났는데 Barbaliscia *et al.* (1993)에 따르면, 이러한 기울기 변화로 하늘 상태가 맑음인지 약한 흐림인지를 구분이 가능함을 언급하였다. 이와 관련된 분석은 이후 운량을 이용한 하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 분포에서 좀 더 살펴보고자 한다.

Fig. 5(b)에는 계절에 따른 두 채널의 누적 분포 함수의 결과를 나타내었다. 먼저, 22.2 GHz 채널에 대한

계절별 누적분포 함수의 차이는 여름철이 겨울철에 비해 수증기 밀도가 높기 때문에 여름철의 밝기온도 분포가 겨울철 보다 높게 나타나고 있다. 30.0 GHz 채널에 대한 계절별 누적분포 함수의 차이는 연강수량의 대부분이 여름철에 집중되어 상대적으로 강수발생 가능 구름의 형성이 여름철에 증가하여 30.0 GHz 채널에서의 방출(emission)이 강하기 때문에 여름철 밝기온도가 겨울철에 비해 높게 나타났다.

밝기온도로부터 산출된 가강수량과 구름물량의 일년간 누적분포를 통해서도 유사한 결과를 볼 수 있다 (Fig. 6). Fig. 5에서 보였듯이 22.2 GHz와 30.0 GHz에서의 뚜렷한 기울기의 변화가 105K(5%)와 50 K(7%)에서 각각 나타났는데 가강수량의 경우 95%, 구름물량의 경우 97%에서 맑은 하늘과 약한 흐림 정도를 구분 지을 수 있다. 가강수량의 경우에는 표본 비율이 95% 이상인 영역에서는 대기 중의 수증기에 의한 흡수 과정이 지배적이므로 그 분포가 민감하게 반응하고 있으며 1 ~ 5% 에서는 약한 흐림 날씨로 구름물량의 값이 점차 증가를 보이며 이후 1% 이하의 강수발생 가능 구름이 발생하는 영역에서는 수증기보다 대기 중 구름물량의 증가로 가강수량보다 구름물량이 상대적으로 더 커 더욱 민감하게 나타나는 결과를 보여준다.

누적분포 함수를 이용한 가강수량과 구름물량의 월 변화 및 일변화를 좀 더 살펴보기 위해 Fig. 7에 누적 함수의 각 백분위수에 대한 가강수량과 구름물량의 값을 월별로 살펴보았다. 대기 중 수증기에 대한 열적반응

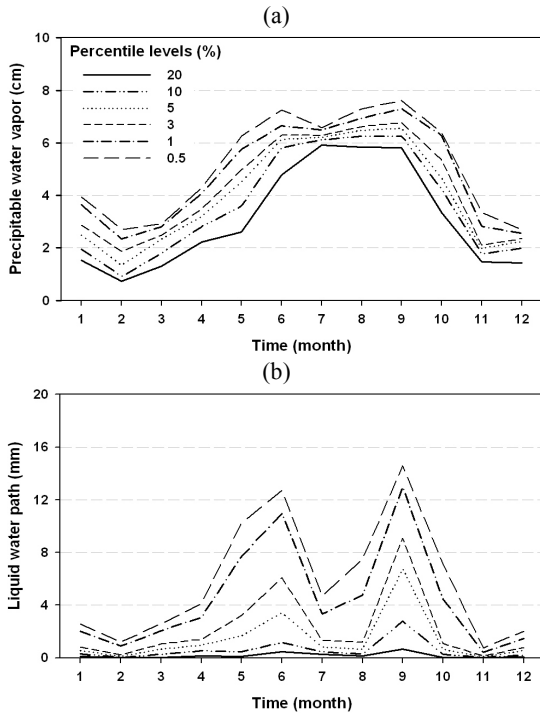


Fig. 7. Monthly percentiles of (a) precipitable water vapor and (b) liquid water path. Each line means each percentile level (see the legend).

에 의한 기후학적 변동이 가강수량의 월별 백분위수 약 5%까지 나타났으며 6월과 9월에 극값을 보이는 강수 발생 가능 구름과 관련된 계절변동은 1% 이하의 극히 일부분에서만 나타났다. 구름물량의 월별 백분위수 분포는 20% 이상에서는 거의 월별 백분위수의 변화가 없지만, 10% 이하에서는 강수발생 가능 구름과 관련하여 6월과 9월에 높게 나타났다.

### 3.2 가강수량과 구름물량의 일변화

가강수량의 일평균과 편차에 대한 시간변화를 Fig. 8에 나타내었다. 가강수량의 일변화(Fig. 4)의 결과에서도 살펴본 것처럼 대기 중 수증기에 대한 열적반응의 차이로 가강수량의 일평균이 겨울(0.95cm)철에 비해 여름(4.43 cm)에 더욱 크게 나타나고 있으며 여름과 겨울의 평균편차는 각각 1.3 cm와 0.59 cm 정도였다. 가강수량과 구름물량의 월별(계절별)차이가 일변화에 비해 규모가 커서 시간변화(일변화)가 뚜렷하게 나타나지 않아(Fig. 8) 가강수량과 구름물량의 일변화 시계열 자료의 시간규모 분해(EMD 방법)를 통해 가강수

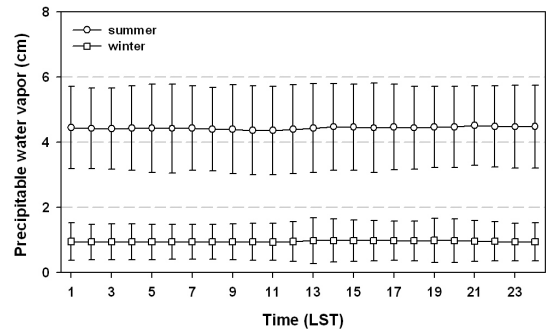


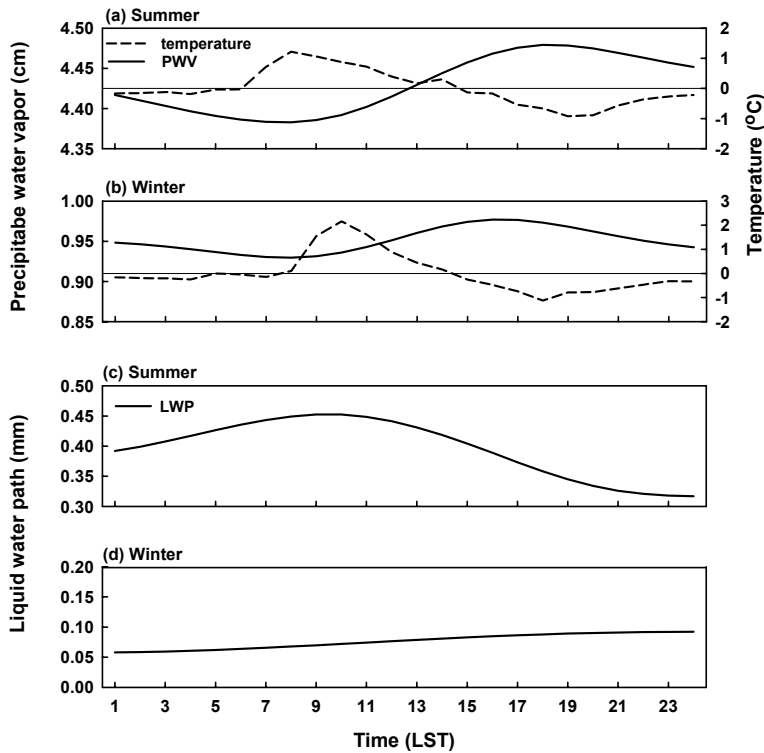
Fig. 8. Hourly means and plus/minus standard deviations of precipitable water vapor in summer (filled circles) and in winter (filled boxes).

량과 구름물량의 일변화 경향을 살펴보았다. EMD 분석의 원시 입력 자료로는 가강수량과 구름물량의 시간 평균 시계열이 이용되었다. 다양한 시간규모의 시계열로 분해된 후 나머지( $r_n$ )인 경향 시계열에서 가강수량과 구름물량의 일변화 주기가 나타났으며 이를 Fig. 9에 나타내었고 가강수량의 경우에는 시간평균기온의 변화도 함께 보였다.

여름철에는 가강수량이 0800 LST부터 증가하기 시작하여 1800 LST에 일최고값을 보인 후 감소하는 경향(Fig. 9(a))을 보이며 이에 반해 겨울철에는 0900 LST에서 증가하기 시작하여 1600 LST에 일최고값을 보인 후 감소하는 경향(Fig. 8(b))을 보였는데 이는 Guldner and Spänkuch(1999)와 유사한 결과이다. 가강수량의 일변화는 수증기의 열적반응에 대한 차이로 기온의 시간변화와 비교해보면 계절에 따른 일출시각의 차이로 일최저기온이 여름의 경우 약 7시, 겨울에는 8시에 나타나고 이후 기온의 증가함에 따라 가강수량의 증가가 나타난다고 볼 수 있다. 가강수량이후 분 단위의 해상도로 산출되기 때문에 인류에 의한 가강수량의 변화가 거의 없다고 가정한다면, 결국 가강수량의 시간변화는 관측지점의 증발산과 이슬의 형성 등에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 즉, 일출 이후 일사량이 어느 수준에 도달하게 되어 대기 중 증발산이 시작되어 이로 인해 가강수량의 증가하게 된다. 1400 LST 경에 기온이 감소하기 시작하면 이후 가강수량의 감소도 동반한다. 이와 같이 가강수량의 일변화는 대기 중의 수증기의 열적반응에 민감하여 기온의 일변화와 밀접한 관련이 있음을 보여준다.

구름물량의 일변화는 여름의 경우, 오전(0800~1000 LST)에 최대치가 나타난 이후 그 값이 현저히 낮아지





**Fig. 9.** Trends of hourly mean (solid lines) of precipitable water vapor ((a) and (b)) and liquid water path ((c) and (d)) from EMD (Empirical Mode Decomposition) method in summer and winter. Diurnal variation of surface air temperature also are displayed (dash lines) at (a) and (b).

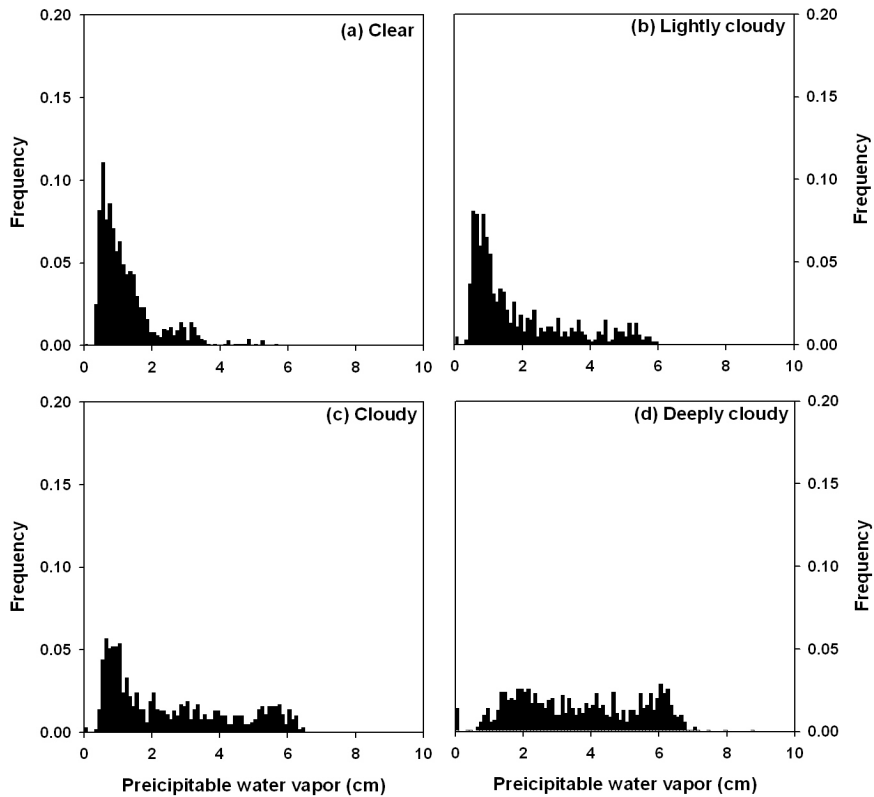
는 특징을 보이고 있다. 정지현과 서명석(2005)에 따르면 우리나라 우기의 강수량의 일변화는 대체로 쌍봉우리분포(bi-modal)를 보이거나 지리적 위치에 따라서 일변화가 다르게 나타남을 보였다(Lim and Kwon, 1998). 특히, 목포와 남해와 같은 서해안과 남해안 지역에서는 일 1회 오전에 일최대치가 나타나는 강수일변화 패턴을 밝혔는데(정지현과 서명석, 2005; 하창환과 문승의, 1996) 이는 여름철 구름물량의 일변화가 여름철 강수발생 가능 구름의 빈번한 발생과 관련된 해남지역의 여름철 강수일변화 특징을 설명한다. 이에 반에 겨울철에는 다소의 상승되는 경향이 있으나 그 정도가 미비하고 뚜렷한 일변화 특징은 나타나지 않았다. 이는 우리나라가 몬순 기후에 속하여 겨울철 강수량이 여름철에 비해 많지 않으며 강수일변화 변동은 계절적으로 여름이 우세하기 때문으로 사료되며(Jung *et al.*, 2001; Winkler *et al.*, 1988), 또한 라디오미터의 프로파일링 과정에서 대기 중 수증기와 산소에 대한 흡수밴드를 이용한 것으로 강설에 대한 흡수프로세스가 없기 때문에 여름철과 달리 겨울철 강수 일변동성과 관련된 두

드러진 구름물량의 일변화는 나타나지 않은 것으로 사료된다.

### 3.3 하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 분포

하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 분포특성을 분석하기 위해 운량을 이용하여 하늘상태를 4단계로 구분하였다. 기상청 『예보업무 규정 및 지침』에 따라 운량이 0에서 2까지를 ‘맑은 날(clear)’, 운량이 3에서 5까지를 ‘구름 조금 낀 날(lightly cloudy)’, 운량이 6에서 8까지를 ‘구름 많은 날(cloudy)’, 마지막으로 운량이 9에서 10까지를 ‘흐린 날(deeply cloudy)’로 분류하였다. 해남 관측소에서는 운량관측을 시행하지 않아 본 연구에서는 해남에서 약 21 km 떨어진 완도기상대의 3시간 운량 관측자료를 이용하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 빈도분포를 보여준다. ‘맑은 날’ 경우, 가강수량은 0.5 cm에서 가장 높은 빈도를 보이는 아치형의 분포를 보이다가 운량이 증가할수록 5.0 ~ 6.0 cm 부



**Fig. 10.** Frequency distribution of precipitable water vapor in various sky conditions. (a) 'Clear', (b) 'Lightly cloudy', (c) 'Cloudy', and (d) 'Deeply cloudy' indicate that total cloud amount from visual observation at Wando observatory is range from 0 to 2, from 3 to 5, from 6 to 8, and from 9 to 10.

근에서 두 번째 극값을 보이는 분포 특징을 보이고 '흐린 날'에는 이중극값이 각각 2.0 cm와 6.0 cm에서 나타났다. 구름물량의 경우(Fig. 11), '맑은 날'에서는 모든 값이 0.1 mm 이하의 값을 가지고 분포하며 '구름 조금 낀 날'과 '구름 많은 날'도 각각 0.2 mm, 0.5 mm로 구름물량의 분포 폭이 좁으며 주로 0.1 mm의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 운량이 증가하여 '흐린 날'에서는 거의 2.0 mm 부근까지 상대적으로 다른 하늘상태에 비해 넓게 분포하는 것을 볼 수 있으며 0.1 mm 이하의 빈도수도 감소하는 것을 볼 수 있었다.

앞서 분석한 가강수량과 구름물량의 연누적분포 함수 결과를 살펴보면(Fig. 6), 약 5 ~ 7%에서 가강수량과 구름물량의 누적분포함수의 급격한 기울기의 변화가 나타났다. 이때의 가강수량과 구름물량의 값이 각각 약 5.7 cm와 0.7 mm이다. 하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 분포에서도 '맑은 날'과 '흐린 날'의 하늘상태에서 각각의 가강수량과 구름물량의 빈도함수 분포가 나타나고 있어 이러한 기울기 변화로 하늘

상태가 맑음과 약한 흐림의 구분이 가능하다는 Barbaliscia *et al.*(1993)의 결과에 만족하는 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

또한, 관측자의 천정하늘의 구름의 양을 단순 목측에만 의존해왔던 왔던 운량관측을 하늘상태에 따른 실제 관측된 가강수량과 구름물량이 정량적 분포 특성을 살펴봄으로서 라디오미터를 이용한 운량의 관측 가능성을 정성적으로 보여주는 결과라고 사료된다.

#### 4. 요약 및 결론

시 공간적으로 고해상도의 운습도 프로파일을 제공하여 대기의 연직구조를 상세히 관측할 수 있는 라디오미터가 해남 위험기상 집중관측 센터에 2007년 7월에 설치되어 수분 단위로 가강수량과 구름물량이 산출되고 있다. 본 연구에서는 라디오미터의 산출자료인 가강수량과 구름물량의 다양한 시간 기준(계절별, 월별, 시간별)에 대한 이들의 분포 특성과 하늘상태에 따

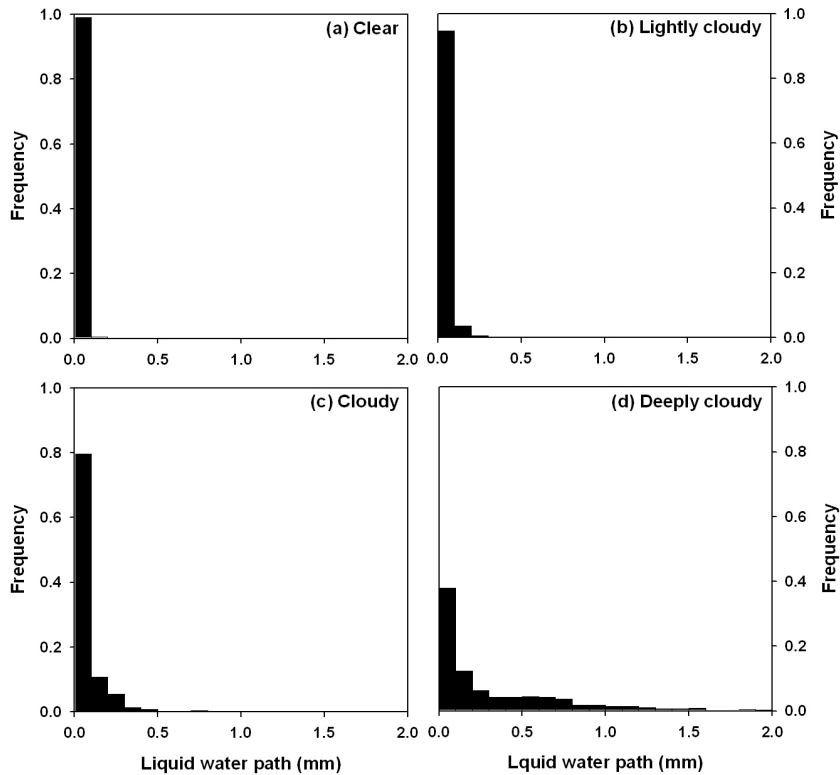


Fig. 11. The same as Fig. 10, but for liquid water path.

른 빈도분포를 조사하였다.

가강수량의 월변화는 대기 중 수증기에 대한 열적반응과 관련하여 기후학적 변동 특성을 보이되, 약 5% 백분위수까지 나타났으며 1% 이상에서는 강수발생 가능 구름과 관련된 계절적 변동도 나타났다. 구름물량의 월변화는 강수발생 가능 구름과 관련되어 강수량과 동일한 월변화를 보여 6월과 9월에 극값이 보였으며 이러한 특징은 약 10% 백분위수 이하에서만 나타났다.

가강수량의 일변화는 대기 중 수증기의 열적반응과 관련되어 기온의 일변화와 일사량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 일출 이후에 기온이 증가하기 시작하면 약 1-2시간 이내에 가강수량이 증가하기 시작하여 기온이 감소하기 시작하면 다시 가강수량이 감소하기 시작한다. 이러한 가강수량의 일변화는 대기 중 수증기의 증발산 및 이슬의 생성과 관련이 있다. 구름물량은 다른 계절에 비해 여름철에 변동성이 크게 나타났으며 여름철 구름물량의 일변화는 강수발생 가능 구름과 관련되어 해남 지역의 여름철 강수일변화를 설명한다.

‘맑은 날’ 0.5 cm 부근에서 극값이 보이던 가강수량

이 ‘흐린 날’이 될수록 6.0 cm 부근에서 다른 극값을 보이는 쌍봉우리(bi-modal)분포를 보인다. 구름물량은 맑은 날 거의 0.1 mm 이하에서 분포하나 흐린 날이 될수록 2.0 mm까지 넓게 분포하는 특성을 보였다. 이러한 하늘상태에 따른 가강수량과 구름물량의 분포 특징은 가강수량과 구름물량의 연누적분포 함수의 나타나는 기울기의 변화와 일치하여 이로써 하늘상태를 구분하는 것이 가능함을 보여주었다.

본 연구에서는 1년간 수집된 라디오미터의 가강수량과 구름물량을 이용하여 해남지역의 가강수량과 구름물량의 분포 특성을 살펴보았다. 비록 짧은 자료 수집기간이고 여름철 자료의 유실이 다소 있었지만, 해남지역의 기후학적이고 국지적인 가강수량과 구름물량의 월별화와 일변화를 살펴볼 수 있었던 연구결과이며 또한 라디오미터를 이용한 하늘상태의 구분가능성을 정성적으로 보여주는 결과라고 사료된다. 향후, 기상청 현업 라디오미터 9대가 도입되면 각 지역의 가강수량과 구름물량 분포 특성 뿐 아니라 한반도 공간분포 특성에 대한 분석도 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 ‘예보기술 지원 및 활용 연구’의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국립기상연구소, 2008: *KEOP 백서 (2001~2008)*. 366 pp.
- 김기훈, 김연희, 장동언, 2009: KEOP-2007 라디오존데 관측 자료를 이용한 장마 특성 분석: Part I. 라디오존데 관측 자료 평가 분석. *대기*, **19**(2), 213-226.
- 장기호, 오성남, 정기덕, 양하영, 이명주, 정진입, 조요한, 김효경, 박균명, 염성수, 차주완, 2007: 구름물리 관측시스템 및 산출물 검증. *대기*, **17**(1), 101-108.
- 전은희, 김연희, 김기훈, 이희상, 2008: 지상 기반 듀얼 밴드 라디오미터의 운영 및 활용 가이드. *대기*, **18**(4), 441-458.
- 정지현, 서명석, 2005: 우리나라 우기(6-9월) 시간강수의 일변화 특성과 그 유형. *한국기상학회지*, **41**(4), 533-546.
- 조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙, 2001: GPS를 이용한 가강수량 측정정밀도 검증. *한국기상학회지*, **37**(5), 557-565.
- 조희구, 이승만, 1982: 대기중의 물자원에 관한 연구. *한국기상학회지*, **18**(2), 18-25.
- 하지현, 박관동, 장기호, 양하영, 2007: MWR 관측치와 비교를 통한 GPS 가강수량 정밀도 검증. *대기*, **17**(3), 291-298.
- 하창환, 문승의, 1996: 우리나라의 강수 일변화에 대한 시공간적 변동 특성. *한국기상학회 학술대회 초록집*, 144-144.
- Barbaliscia, F., E. Fionda, and P. G. Masullo, 1993: Characterization of the status of the sky by means of radiometric observation at 20/30 GHz. *Proceeding of the 1993 Symposium on Radio Propagation of Radio Propag. Soc.*, 210-213.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1998: Ground-based radiometric measurements of atmospheric brightness temperature and water contents in Italy. *Radio Sci.*, **33**(3), 697-706.
- Dong, X. and G. G. Mace, 2003: Artic stratus cloud properties and radiative forcing derived from ground-based data collected at Barrow, Alaska. *J. Climate*, **16**, 445-461.
- Doran, J. C., S. Zhong, J. C. Liljegren, C. Jakob, 2002: A comparison of cloud properties at a coastal and inland site at the North Slope of Alaska. *J. Geophys. Res.*, **107**(D11), 4120, doi:10.1029/2001JD000819.
- Güldner, J. and D. Spänkuch, 1999: Results of year-round remotely sensed integrated water vapor by ground-based microwave radiometry. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 981-988.
- Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, 1998: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **454**, 903-993.
- Huang, N. E. and Z. Wu, 2008: A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies, *Rev. Geophys.*, **46**, RG2006, doi:10.1029/2007RG000228.
- Iassamen, A., H. Sauvageot, and N. Jeannin, 2009: Distribution of tropospheric water vapor in clear and cloudy conditions from microwave radiometric profiling. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **48**, 600-615.
- Jung, H. S., G.-H. Lim, and J.-H. Oh, 2001: Interpretation of the transient variations in the time series of precipitation amounts in Seoul, Korea. Part I: diurnal variation, *J. Climate*, **14**, 2989-3004.
- Kim, D., and H.-S. Oh, 2008: *Empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis*. Available at [http://dasan.sejong.ac.kr/~dhkim/software\\_emd.html](http://dasan.sejong.ac.kr/~dhkim/software_emd.html).
- Kwon, H.-T., T. Iwabuchi, and G.-H. Lim, 2007: Comparison of precipitable water derived from ground-based GPS measurements with radiosonde observations over the Korean Peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**(6), 733-746.
- Lim, G.-H., H.-J. Kwon, 1998: Diurnal variation of precipitations over south Korea and its implication. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**(2), 221-237.
- McMahon, T. A., A. S. Kiem, M. C. Peel, P. W. Jordan, G. G. Pegram, 2008: A new approach to stochastically generating six-monthly rainfall sequences based on Empirical Mode Decomposition. *J. Hydrometeor.*, **9**(6), 1377-1389.
- Radiometrics Corporation, 2007: Profiler operator's manual. Radiometrics Corporation, 69 pp.
- Snider, J. B., 2000: Long-term observations of cloud liquid, water vapor, and cloud-base temperature in the North Atlantic Ocean. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 928-939.
- Solheim, F., J. R. Godwin, E. R. Westwater, Y. Han, S. J. Kiehm, K. Marsh, and R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Sci.*, **33**, 393-404.
- Torrence, C., and G. P. Compo, 1998: A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 61-78.
- Wang, J., A. Dai, D. J. Carlson, R. H. Ware, and J. C. Liljegren, 2002: Diurnal variation in water vapor and liquid water profiles from a new microwave radiometer profilers. *6th Integrated Observing System of Amer. Meteor. Soc.*
- Ware, R., R. Carpenter, J. Guldner, and J. Liljegren, 2003: A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. *Radio Sci.*, **38**(4), 8079, doi:10.1029/2002RS002856.
- Winkler, J. A., B. R. Skeeter and P. D. Yamamoto, 1988: Seasonal variations in the diurnal characteristics of heavy hourly precipitation across the United States. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1641-1658.
- Won, H. Y., Y.-H. Kim, H.-S., Lee, 2009: An application of brightness temperature received from a ground-based microwave radiometer to estimation of precipitation occurrences and rainfall intensity. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **45**(1), 55-69.